

09.3

Исследование однородности распределения накачки в активном элементе в виде стержня мощных квантронов с диодной накачкой

© С.Д. Таривердиев^{1,2}, А.Е. Дракин³, О.В. Пагаев¹, Г.Т. Микаелян^{1,2,4}, А.Л. Коромыслов³,
А.В. Березуцкий^{1,2}, А.И. Демидчик¹

¹ ООО „Лассард“, Обнинск, Калужская обл., Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴ ООО „НПП „Инжект“, Саратов, Россия

E-mail: tsamir0591@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 13 мая 2023 г.

Принято к публикации 16 мая 2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований и расчеты разных оптических схем мощных квантронов и твердотельных лазеров с цилиндрическими активными элементами и поперечной накачкой решетками лазерных диодов. С помощью численного моделирования решены гидродинамические задачи и задачи геометрической оптики для квантронов с цилиндрическими активными элементами с накачкой решетками лазерных диодов квазинепрерывного режима работы. Исследованы зависимости степени равномерности освещения активного элемента от геометрии оптической схемы, а также влияние равномерности потоков охлаждающей жидкости по различным плечам накачки на однородность профиля распределения люминесценции с торца активного элемента. Предложена и реализована оптическая схема накачки активного элемента мощного твердотельного квантрона с оптимальной геометрией.

Ключевые слова: твердотельный лазер, диодная накачка, квантрон, активный элемент.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55737.19609

В настоящее время твердотельные лазеры широко применяются в лазерных системах для обработки материалов, в медицине, военной технике, научных исследованиях, в системах с преобразованием частоты излучения, в перспективных системах лазерного термоядерного синтеза. Квантрон — основная функциональная часть излучателя лазера или лазерного усилителя, состоящая из активного элемента (АЭ), диодной накачки и отражателя, заключенных в общий корпус. Одной из ключевых задач при разработке квантронов и твердотельных лазеров является оптимизация оптической схемы накачки с целью получения максимально однородного профиля распределения излучения с торца АЭ и большого коэффициента усиления по слабому сигналу. В ряде работ [1–3] рассмотрены физические модели квантронов с поперечной диодной накачкой цилиндрических АЭ. Однако такие факторы, как неравномерное распределение излучения по поперечному сечению АЭ, возникающее из-за технологических и конструктивных особенностей квантронов, реальный разброс длин волн диодных лазеров из-за неравномерного потока охлаждающей жидкости по плечам накачки, в указанных моделях не учитывались.

В проведенных расчетах учитывались следующие конструктивные особенности квантронов: схема расположения решеток лазерных диодов вокруг АЭ; значения расстояний от центра активного элемента до излучающих поверхностей решеток лазерных диодов (РЛД); распределение излучения РЛД относительно оси активного

элемента (направления быстрой и медленной осей); соотношение всех геометрических размеров излучающих и засвеченных элементов.

На рис. 1 показаны результаты расчета по гидродинамической модели одного из вариантов квантрона и соответствующее распределение температуры на теплообменниках (обозначены цифрами 1–5). Расчеты ведутся путем численного решения уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости с учетом реальных параметров конструкции:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f, \quad \nabla v = 0,$$

где ρ — плотность, v — скорость на входе, V — скорость в каналах, t — время, p — давление жидкости, μ — коэффициент вязкости, f — другие силы, действующие на тело, такие как гравитация, ∇ — оператор Гамильтона, частная производная по координатам. Термодинамические свойства воды: $\rho = 0.9982 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Градицией цвета отмечены скорости движения воды и температуры теплообменников и кварцевой трубки. Из рис. 1 (схема сверху слева) видно, что скорость течения охлаждающей жидкости через канал охлаждения активного элемента 6 и через теплообменник 1 является наиболее низкой (соответственно температура на РЛД самая высокая, см. нижний фрагмент на рис. 1), а через теплообменник 2 — максимальной (соответственно температура на РЛД самая низкая).

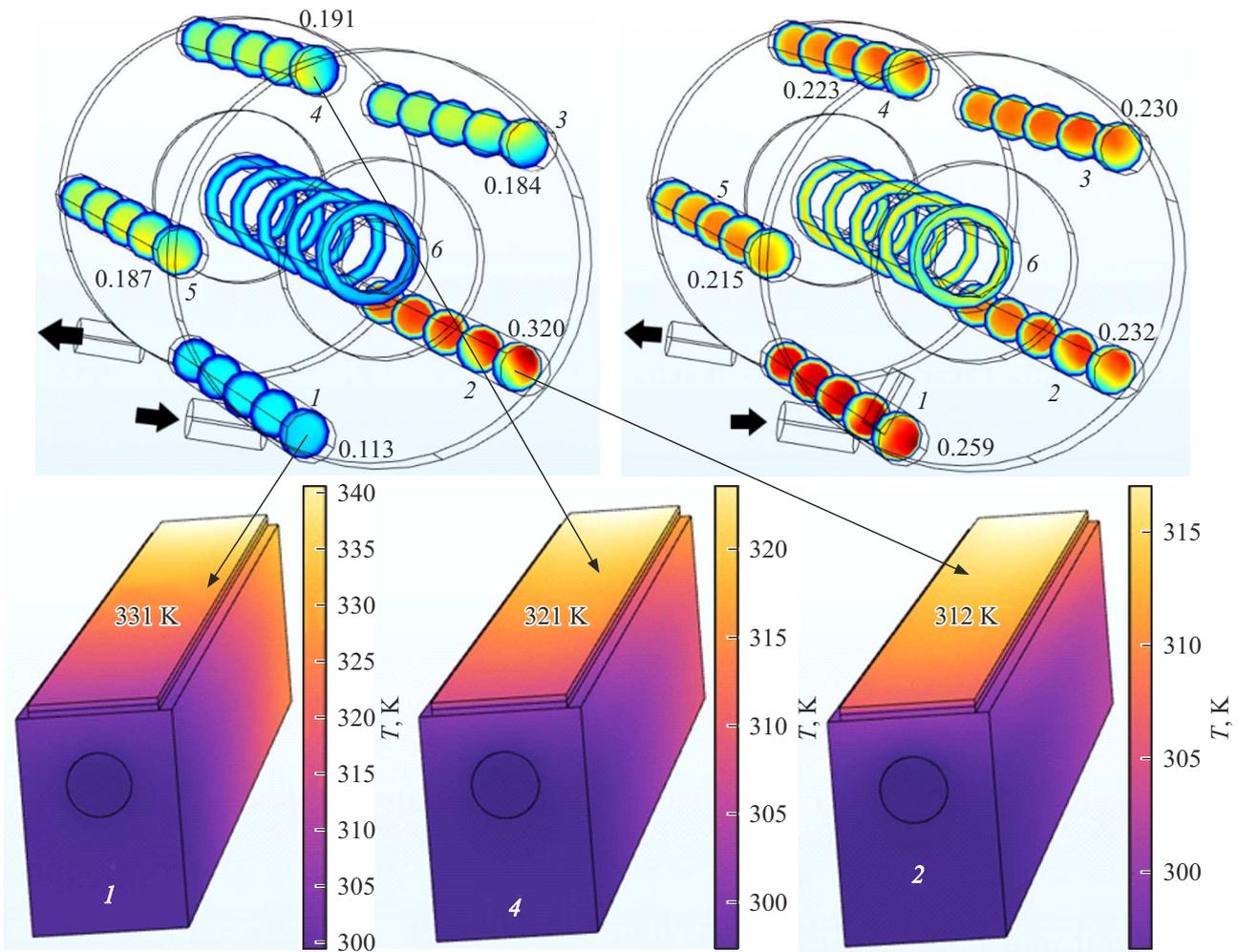


Рис. 1. Гидродинамическая модель квантрона, полученная с помощью программы для расчета и моделирования конструкций по методу конечных элементов. Вверху слева — модель с неравномерной подачей воды; вверху справа — модель с конструкцией, обеспечивающей равномерную подачу воды; внизу — распределение температуры на теплообменниках 1, 2 и 4. Числа на верхних фрагментах — скорости потока (в m/s).

Такое распределение скорости движения охлаждающей жидкости в конечном итоге приводит к неравномерности поглощенной энергии накачки, что в свою очередь ведет к искажению картины профиля люминесценции и низким значениям коэффициента усиления. Для решения проблемы, связанной с равномерным отводом тепла от плеч накачки квантрона, на вход охлаждающего контура квантрона был добавлен конструктивный элемент, обеспечивающий равномерность распределения воды на входном коллекторе. Это позволило получить более равномерное распределение скорости потока охлаждающей жидкости по каналам теплоотводов квантрона (рис. 1, схема вверху справа).

В настоящей работе определены наиболее эффективные геометрии расположения РЛД. На рис. 2 показаны рассчитанные распределения излучения накачки в активном элементе. Моделирование конструкции квантрона проводилось с помощью метода конечных элементов. При моделировании распространения излучения учиты-

вались следующие физические процессы и механизмы: коэффициент отражения в зависимости от поляризации излучения определялся по формулам Френеля [4]; поглощение излучения во всех оптических элементах и узлах определялось по закону Бугера $I = I_0 \exp(-k_v l)$, где k_v — коэффициент поглощения, l — длина слоя среды, на котором происходит поглощение [4]; преломление света на границах раздела сред составляло $n_1 \sin i = n_2 \sin r$, где n_1 и n_2 — показатели преломления среды, из которой луч падает на границу раздела сред и в которую луч попадает после границы раздела сред соответственно, i и r — угол падения луча на границу раздела сред и угол преломления луча соответственно [4].

Равномерное распределение излучения накачки в активном элементе достигается при смещении плеч от радиального расположения. Наиболее оптимальным является сдвиг центра решетки диодных линеек на 1 mm (рис. 2, б) при длине излучающей решетки лазерных

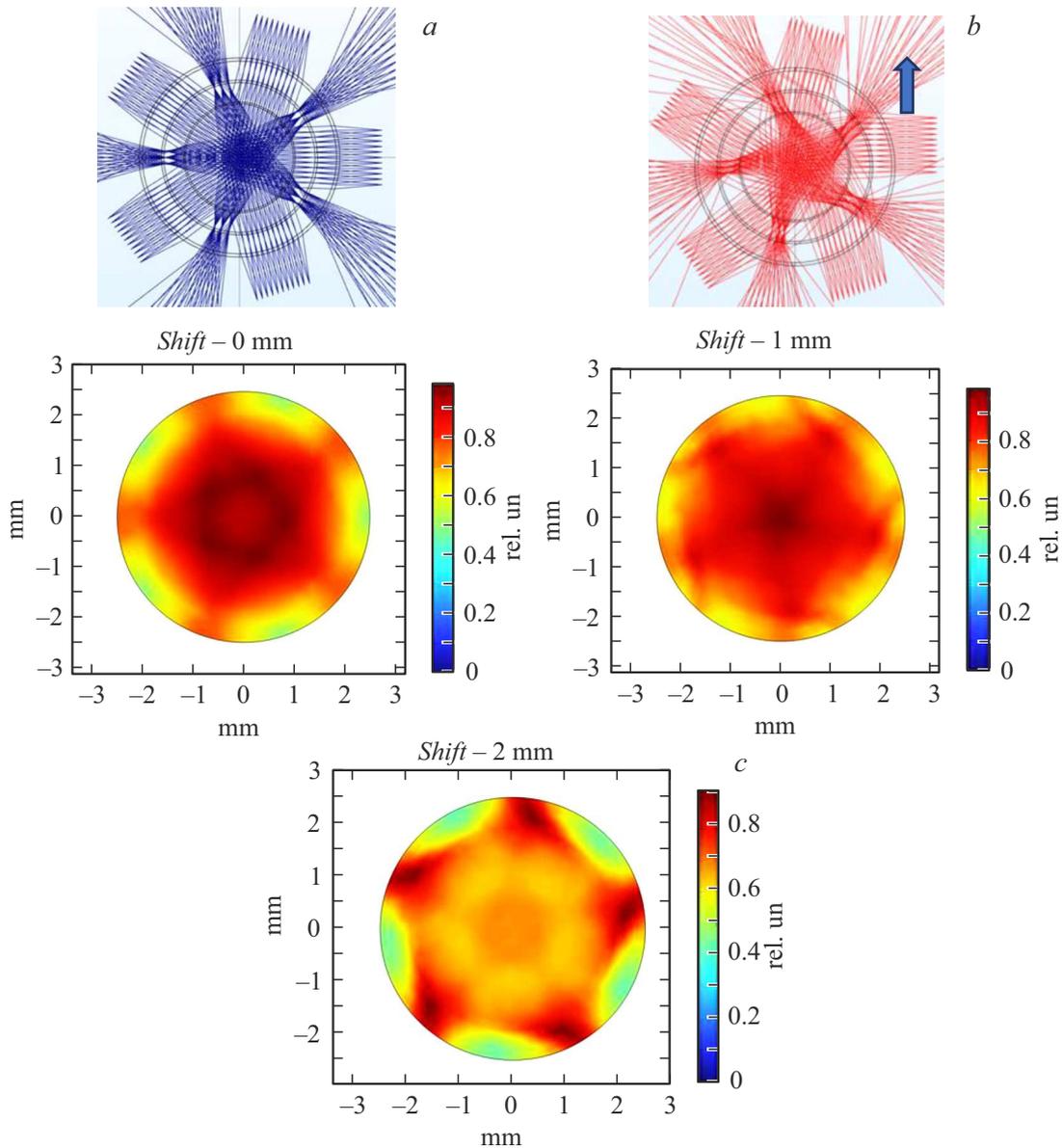


Рис. 2. Распределение излучения накачки в активном элементе диаметром 5 мм. *a* — без смещения плеч, *b* — при смещении плеч на 1 мм, *c* — при смещении плеч на 2 мм.

диодов порядка 3 и 5 мм для квантронов с диаметром АЭ 5 и 10 мм соответственно.

На рис. 3 представлены профили поперечного распределения люминесценции двух исследованных квантронов (КВ-5: диаметр АЭ 5 мм, длина АЭ 100 мм, количество плеч накачки 5; КВ-10: диаметр АЭ 10 мм, длина АЭ 130 мм, количество плеч накачки 5). Смещение максимума люминесценции от центра кристалла вызвано неоднородностью теплоотведения. Неоднородное распределение по поперечному сечению в виде „звезды“ обусловлено несовершенством схемы накачки и указывает на места расположения теплообменников с РЛД. Неоднородность распределения профиля люминесценции по сечению активного элемента до оптимизации

конструкций квантронов составляет 20–30%, а для оптимизированных конструкций — менее 10%.

Квантроны были исследованы также в составе твердотельного лазера. Использовался резонатор с длиной 45 см, состоящий из двух плоских зеркал с коэффициентами отражения $R_1 = 99.8\%$ и $R_2 = 70\%$. В режиме свободной генерации (длительность импульса 250 μs , частота повторения 30 Hz) для АЭ с диаметром 5 мм и длиной накачки 84 мм получена энергия в импульсе $E = 1 \text{ J}$ при импульсной мощности накачки $P = 25 \text{ kW}$, для АЭ с диаметром 10 мм и длиной накачки 124 мм — $E = 2 \text{ J}$ при импульсной мощности накачки $P = 30 \text{ kW}$.

Проведены также исследования зависимости коэффициента усиления (K_0) слабого сигнала (1 kW) от тока на-

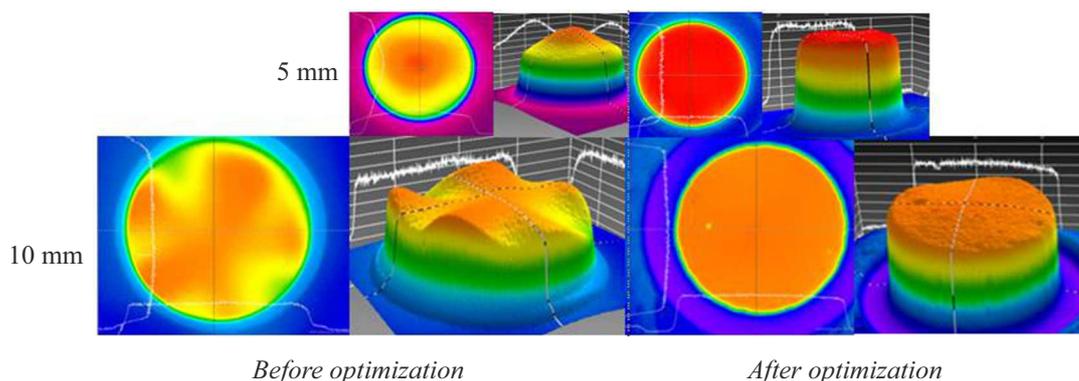


Рис. 3. Профили распределения люминесценции квантронов с диаметром АЭ 5 и 10 mm до и после оптимизации.

качки для твердотельных усилителей с АЭ диаметрами 5 и 10 mm и длинами 100 и 130 mm соответственно. До $K_0 = 80$ насыщение усиления от тока накачки наборов линеек диодных лазеров не наблюдается. Для квантрона с диаметром АЭ 5 mm достигнуто значение коэффициента усиления $K_0 = 370$.

Проведены исследования и оптимизация квантронов с диодной накачкой с цилиндрическими АЭ с диаметрами 5 и 10 mm и длинами 100 и 130 mm соответственно. Предложена оптимальная конструкция, учитывающая расположение наборов РЛД вокруг АЭ. Равномерное распределение излучения накачки в активном элементе достигается смещением расположения теплообменников с РЛД от радиальной линии. Достигнуты значения усиления слабого сигнала $K_0 \geq 370$ и $K_0 \geq 80$ для диаметров стержня 5 и 10 mm соответственно. Неравномерность распределения усиления по поперечному сечению в обоих случаях составляет менее 10%.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.Г. Гречин, П.П. Николаев, Квантовая электроника, **39** (1), 1 (2009). [S.G. Grechin, P.P. Nikolaev, Quantum Electron., **39** (1), 1 (2009). DOI: 10.1070/QE2009v039n01ABEH013787].
- [2] S.K. Sharma, P.K. Mukhopadhyay, A. Singh, R. Kandasamy, S.M. Oak, Rev. Sci. Instrum., **81** (7), 073104 (2010). DOI: 10.1063/1.3457000
- [3] В.В. Кийко, В.И. Кислов, Е.Н. Офицеров, А.Г. Суздальцев, Квантовая электроника, **45** (6), 511 (2015). [V.V. Kiyko, V.I. Kislov, E.N. Ofitserov, A.G. Suzdal'tsev, Quantum Electron., **45** (6), 511 (2015). DOI: 10.1070/QE2015v045n06ABEH015287].
- [4] M. Born, E. Wolf, *Principles of optics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).